

文章编号: 0253-9985(2007)02-0203-06

剩余压力差在超压盆地天然气高效成藏中的意义

柳广弟, 孙明亮

(中国石油大学 油气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要: 油气形成过程中的成藏动力可以由剩余压力差和浮力两部分共同表述。常压盆地中, 浮力为主要成藏动力; 超压盆地中, 剩余压力差与浮力的和可以代表石油运移过程中的成藏动力、也可以反映天然气运移过程中的最小成藏动力。不同成藏过程中剩余压力差和浮力在整个成藏动力中的相对贡献表明, 无论在垂向运移过程还是侧向运移过程, 剩余压力差在天然气成藏动力中发挥了主导作用, 是天然气形成的主要成藏动力。结合我国 60 余个气藏实例解剖发现, 剩余压力差控制了天然气的成藏效率, 低剩余压力差部位无法形成中、高效气藏, 高剩余压力差是形成高效气藏的必要条件。

关键词: 剩余压力差; 浮力; 常压; 超压; 天然气; 高效成藏

中图分类号: TE112.2

文献标识码: A

Significance of excess differential pressure in highly efficient gas accumulation in over-pressured basins

Liu Guangdi; Sun Mingliang

(Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education,
China Petroleum University, Beijing 102249, China)

Abstract Hydrocarbon accumulation dynamics can be described with excess differential pressure and buoyancy. In normal-pressure basins, buoyancy is the major force for hydrocarbon accumulation. While in over-pressured basins, the resultant force of excess pressure differential and buoyancy is the force for oil migration and then minimum force for gas accumulation. An analysis of the contributions of excess differential pressure and buoyancy to the total accumulation dynamics in different pooling processes indicates that the excess differential pressure dominates both the vertical and lateral gas migration and accumulation, thus it is the major force for gas accumulation. Dissections of 60 or so gas reservoirs in China also point out that the excess differential pressure controls the efficiency of gas accumulation. Mid- or highly-efficient gas pools will not form in places where low excess differential pressure exists, and high excess differential pressure is a necessary condition for highly efficient gas accumulations.

Key words excess differential pressure; buoyancy; normal pressure; overpressure; highly efficient gas accumulation

油气成藏过程中涉及的主要作用力包括浮力、重力、毛细管力和地层压力^[1]。特定的油气运移环境中, 这些力的综合作用控制着天然气运移的方向与速率, 继而影响天然气的成藏过程和成藏效率。根据天然气运聚平衡原理, 天然气的快速运聚是气藏高效形成的基本条件之一^[2], 而成藏动力是控

制天然气成藏速率的主要因素^[3]。以往的成藏动力研究中, 一般认为由烃-水密度差引起的浮力是油气在地下运移最持久、最有效的动力^[4-7]; 而异常地层压力(超压)是含油气盆地中一种普遍的地质现象, 超压在油气成藏过程中的作用逐渐为人们所重视^[8-10]。随着成藏动力学研究的深入, 人们更加

收稿日期: 2007-03-26

第一作者简介: 柳广弟(1961—), 男, 教授、博士生导师, 石油地质和油气资源评价

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2001CB209103)

重视油气运聚过程中各种动力的综合研究。Hubbert(1953)引入了流体势的概念,将压力(势能)引入成藏动力分析中^[11],England(1987)则进一步加入了界面能^[4]。事实上,在不同的地质条件下,上述各种力的配置和相对贡献存在差异,对天然气高效成藏起主导作用的力也不尽相同。因此,搞清不同成藏环境下控制天然气高效成藏的主要动力,研究天然气高效成藏的动力学机制,不仅具有理论意义,同时对高效成藏过程的定量评价具有重要的实际意义。本文重点研究超压盆地天然气高效成藏的主要动力及其相对贡献。

1 超压环境中的成藏动力构成

研究油气运聚、成藏过程中,常使用流体势的概念表示成藏动力。England(1987)使用单位体积地下流体所具有的机械能为定义的流体势^[4]:

$$\Phi = \rho g H + \rho \int_0^p \frac{\Phi}{\rho(p)} + \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

式中: Φ 为流体势, $\int \rho$ 为流体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为海拔高程, m ; p 为地层压力, Pa ; σ 为界面张力, N/m ; θ 为润湿角, $^\circ$; r 为孔喉半径, m ; $\rho(p)$ 是流体密度随压力变化的函数。

在同一压力体系内,式(1)右端前两项为促使油气运移的动力,后一项是主要阻力。流体势的大小反映地下流体质点能量的高低,两点间流体势差的大小则代表油气运移动力强弱。流体势差(或势梯度)越大,油气运移的动力越强。因此,运移通道中 A 和 B 两点间的成藏动力可表示为:

$$\begin{aligned} \Phi_a - \Phi_b &= \rho_a g H_a - \rho_b g H_b + \rho \int_{p_b}^{p_a} \frac{\Phi}{\rho(p)} - \\ &\quad \rho \int_{p_b}^{p_a} \frac{\Phi}{\rho(p)} + \frac{2\sigma \cos \theta}{r_a} - \frac{2\sigma \cos \theta}{r_b} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Φ_a 和 Φ_b 分别为 A 和 B 两点的流体势, $\int \rho_a$ 和 ρ_b 分别为 A 和 B 两点的流体密度, kg/m^3 ; H_a 和 H_b 分别为 A 和 B 两点的海拔高程, m ; p_a 和 p_b 分别为 A 和 B 两点的压力, Pa ; σ 为界面张力, N/m ; θ 为润湿角, $^\circ$; r_a 和 r_b 分别为 A 和 B 两点的孔喉半径, m 。

事实上,在宏观分析盆地拗陷的油气运移过程中,动力项常常反映米级甚至千米级范畴内的能量分布,而阻力项往往在厘米甚至毫米范围

内就存在巨大的变化。流体势中包含的运移动力和阻力存在尺度上的差异,如将两者同时使用则势必造成误差。因此,在分析天然气成藏动力时,可将运移的动力和阻力分开考虑。阻力大小主要是运移通道特征的反映,在运移通道研究中考考虑。遵循上述思路,本文中所谓的成藏动力重点讨论重力势能和弹性势能两部分,故式(2)简化为:

$$\begin{aligned} \Phi_a - \Phi_b &= \rho_a g H_a - \rho_b g H_b + \rho \int_{p_b}^{p_a} \frac{\Phi}{\rho(p)} - \rho \int_{p_b}^{p_a} \frac{\Phi}{\rho(p)} \\ &= \rho_a g H_a - \rho_b g H_b + \rho \int_{p_b}^{p_a} \frac{\Phi}{\rho(p)} - \rho \int_{p_b}^{p_a} \frac{\Phi}{\rho(p)} \end{aligned} \quad (3)$$

为了更清楚的表示超压在成藏动力中的作用,这里将地层压力用对应深度的静水压力和超压(剩余压力)的和表示,即:

$$p = \rho_w g H + \Delta p \quad (4)$$

式中: Δp 为剩余压力, Pa ;

对于输导层内的不可压缩流体(如:石油), ρ 为常数,两点间的流体势差为:

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= \Phi_a - \Phi_b \\ &= \rho_o g H_a - \rho_o g H_b + p_a - p_b \\ &= \rho_o g H_a - \rho_o g H_b + \rho_w g H_a + \Delta p_a - \\ &\quad \rho_w g H_b - \Delta p_b \\ &= (\rho_w - \rho_o) g (H_a - H_b) + (\Delta p_a - \Delta p_b) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\Delta \Phi$ 为势差, $\int \rho_o$ 和 ρ_w 分别为油、水密度, kg/m^3 ; Δp_a 和 Δp_b 为 A 和 B 两点的剩余压力, Pa 。

可见, A 和 B 两点之间的流体势差可以分解为两部分来表示:一部分是具有 $(H_a - H_b)$ 高度的油柱在水中的净浮力;另一部分就是 A 和 B 两点之间的剩余压力差 $(\Delta p_a - \Delta p_b)$ 。

对于可压缩流体(如:天然气),其体积具有较强的压缩性,导致密度随压力增大而增大,这种变化直接导致气体的弹性势能增大,因此,计算气势时不得不考虑气体密度的因素。此处引入由于地层压力由 A 点 (p_a) 变化到 B 点 (p_b) 造成的弹性势能变化(假设 $p_a > p_b$):

$$d\rho = \int_{p_b}^{p_a} \rho(p) dp \quad (6)$$

在含油气盆地的温度压力范围内,气体的密度随压力的增大而减小。因此,当 $p_a > p_b$ 时,式(6)为正值。

对于可压缩的气体, 地下两点间的气势差可表示为 (假设 $p_a > p_b$)

$$\begin{aligned} \Phi_a - \Phi_b &= \left| \rho_a g H_a + \rho_a \int_a^{p_a} \frac{\Phi}{\rho(p)} \right| - \left| \rho_b g H_b + \rho_b \int_b^{p_b} \frac{\Phi}{\rho(p)} \right| \\ &= \left| (\rho_b + d\rho) g H_a + \rho_a \int_a^{p_a} \frac{\Phi}{\rho(p)} \right| - \\ &\quad \left| \rho_b g H_b + \rho_b \int_b^{p_b} \frac{\Phi}{\rho(p)} \right| > \\ &\quad (\rho_b g H_a + p_a) - (\rho_b g H_b + p_b) \end{aligned} \quad (7)$$

因此, 两点间气体的最小流体势差 (不包括密度变化造成的内能增加) 为:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \Phi_a - \Phi_b \\ &= \rho_b g H_a - \rho_b g H_b + p_a - p_b \\ &= \rho_b g (H_a - H_b) + \\ &\quad (\rho_w g H_a + \Delta p_a - \rho_w g H_b - \Delta p_b) \\ &= (\rho_w - \rho_b) g \Delta H + (\Delta p_a - \Delta p_b) \end{aligned} \quad (8)$$

可见, 两点间的最小气势同样也可用高度为 $(H_a - H_b)$ 的气柱静浮力和剩余压力差 $(\Delta p_a - \Delta p_b)$ 表示。

综上所述, 在研究油气运移过程中, 可以从力的角度将成藏动力分解两个组成部分, 一部分是烃类 (原油、天然气) 在水中的静浮力差, 另一部分是两点之间剩余压力差。常压盆地中, 成藏动力完全由烃-水密度差造成的浮力构成; 而在超压盆地中, 剩余压力差是成藏动力重要组成部分。通过分别计算上述两部分的大小, 可以定量探究油气运移动力的构成, 研究不同地质条件下成藏过程中各种能量对于油气运移动力的贡献, 搞清油气运移的主要动力, 为天然气高效成藏过程主要控制因素的研究提供理论依据。

2 不同成藏条件下天然气成藏的主要动力

2.1 垂向运移过程

由于流体封隔层的存在, 含油气盆地纵向上普遍存在多个流体压力系统^[12]。对我国天然气藏成藏过程的主控因素分析表明, 大多数的大中型气藏是通过断裂将源岩系统与储集层沟通^[3, 13], 而最终

快速成藏的。在这一过程中, 断裂周期性 (或突发性) 起到了沟通不同压力系统的作用^[14, 15]。可以认为, 在天然气的主要成藏期内, 源岩层系与储集体在断裂的连通下构成一个统一的压力系统。此时, 源储之间的流体势差就是油气运移的动力。

库车坳陷是中新生代发展起来的再生前陆盆地, 中新生代普遍发育异常高压。尽管间隔有厚层泥岩 (J_{2+3}), 但白垩系和古近系产层中的天然气仍来自于下伏的下侏罗统煤系^[16]。模拟实验^[17]以及粘土矿物指标^[18]等证据均表明, 连通侏罗系和白垩系的贯穿-贯通型断裂是库车坳陷优势运移通道。在断层的沟通下, 形成垂向叠置的“下生上储”的生储配置。现已发现的克拉 2 气田、大北 1 气田、迪那 2 气田均为此类配置。可见, 库车坳陷的气藏多以断层为主要运移通道, 垂向跨层运聚成藏。

以流体包裹体测压和地球物理资料为限定, 对库车坳陷主成藏时期 (约 1.8 Ma) 侏罗系和白垩系的剩余压力分布进行了模拟恢复。计算结果显示 (图 1a), 在整个坳陷中, 烃源岩 (J) 与储集层 (K) 间存在巨大的剩余压力差, 幅度普遍在 20~30 MPa, 坳陷部位可达 50 MPa 左右。

由于浮力的计算涉及到气柱高度问题, 此处计算了白垩系内完全被气充满情况下顶面的最大浮力。使用回剥技术、考虑压实作用的影响对库车坳陷的古构造进行了恢复, 在此基础上对白垩系顶面的最大浮力进行了计算。结果显示 (图 1b), 整个坳陷内白垩系最大浮力普遍在 4~10 MPa 间, 即使在山前的高陡部位也未超过 15 MPa。上述结果表明, 成藏期间浮力 (梯度) 同样远小于剩余压力 (梯度)。

由此可见, 在库车坳陷天然气垂向运移为主成藏过程中, 剩余压差 (梯度) 比浮力 (梯度) 高近一个数量级, 剩余压差是控制天然气运移的主要动力。

2.2 侧向运移过程

天然气的侧向运移既可以发生在同一压力系统之内, 也可以发生在不同压力系统 (封存箱) 之间。不同压力系统之间的侧向运移有赖于侧向封隔体破裂导致的连通, 与垂向运移的情况相似, 此时两系统之间剩余压力差必然成为天然气运移的主要动力。从流体动力学的理论来讲, 当流体压力达到平衡后, 在同一个压力系统内部是不存在

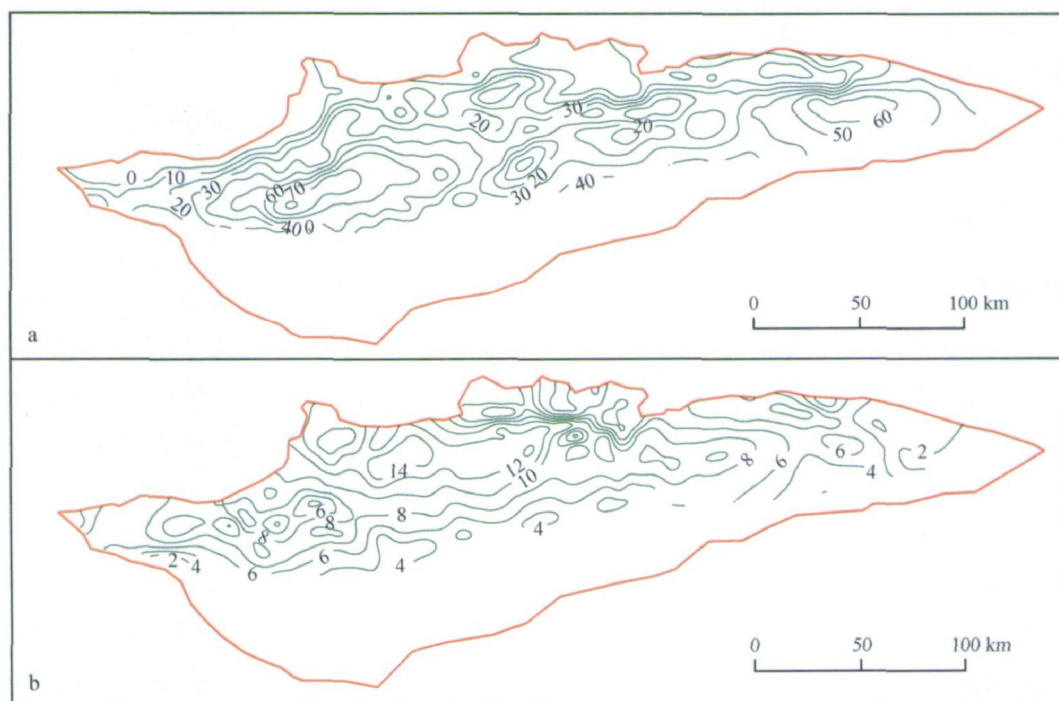


图 1 库车坳陷主成藏期 (1.8 Ma) 的浮力与剩余压力差分布对比图

Fig. 1 Diagram showing the distribution of excess-pressure-differential and buoyancy during the main hydrocarbon reservoir period (1.8 Ma) in Kuqa depression

剩余压力差的, 因此流体主要在浮力的作用下发生运移。但是, 实际盆地的地质条件是十分复杂的, 并且盆地内单个压力系统的规模通常也是相当大的, 可以达到数千米到数十千米, 甚至百余千米大的规模^[8-10], 在这样大的范围内作为多孔介质的输导层通常具有很强的非均质性, 它既不是完全连通的, 也不是完全不连通的^[19]。在这样一个大规模的压力系统内, 超压的形成是不均一的, 因此在压力达到平衡之前, 不同部位之间往往存在明显的剩余压力差。尽管同一压力系统内不同部位之间的压力可以发生传递, 但往往需要相当长的地质时间才能达到平衡。在剩余压力差作用下使流体压力趋于平衡的这一流体传递过程就是在剩余压力差作用下的流体运移。

由于天然气侧向运移输导层的倾角远小于断裂, 因此天然气发生侧向运移时, 单位体积流体静浮力大小很大程度受地层倾角影响:

$$F = (\rho_w - \rho_g)g \sin \theta \quad (\sin \theta < 1) \quad (9)$$

式中: F 为单位体积流体浮力, N ; ρ_w 为地层水密度, kg/m^3 ; ρ_g 为天然气密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ 为地层倾角, $^\circ$ 。

由于, 地层倾角 (θ) 通常小于 30° 。即, 在输导层中发生侧向运移过程时, 通常仅有不足 50% 的浮

力能够转化为有效的成藏动力, 这使得浮力在侧向运移过程中的作用将进一步小于垂向运移过程。下面以四川盆地川西地区上三叠统超压层为例, 说明侧向运移过程中剩余压力与浮力的相对大小关系。

频繁的水体进退导致川西地区上三叠统沉积了煤系与砂体互层的沉积序列, 造就良好的“自生自储”生储配置^[20]。上三叠统须一段和须三段煤系地层中生成的大量天然气直接进入与之毗邻的须二段和须四段。轻烃指纹^[21]以及规律的色层效应^[22]均反映须二段和须四段中发生过大规模的侧向运移过程。

模拟恢复了须家河组成藏期的剩余压力分布。由图 2a 可见, 川西凹陷内存在两个剩余压力中心, 中心部位剩余压力均高达 35 MPa 以上, 剩余压力向两侧逐渐降低, 至盆地边缘降至常压, 陡坡带最大剩余压力梯度接近 0.01 MPa/m, 而缓坡带的剩余压力梯度也可达 0.005 MPa/m。

同样以须二段内完全被天然气所充满为前提, 计算了倾斜地层条件下的最大浮力值。结果显示 (图 2b), 受平缓地层倾斜影响, 须家河组内部天然气在水中的浮力值均较小, 平均为 0.2~0.4 MPa。可见, 剩余压力与浮力间的差别超过两个数量级以上。这一差别导致了在运移过程中,

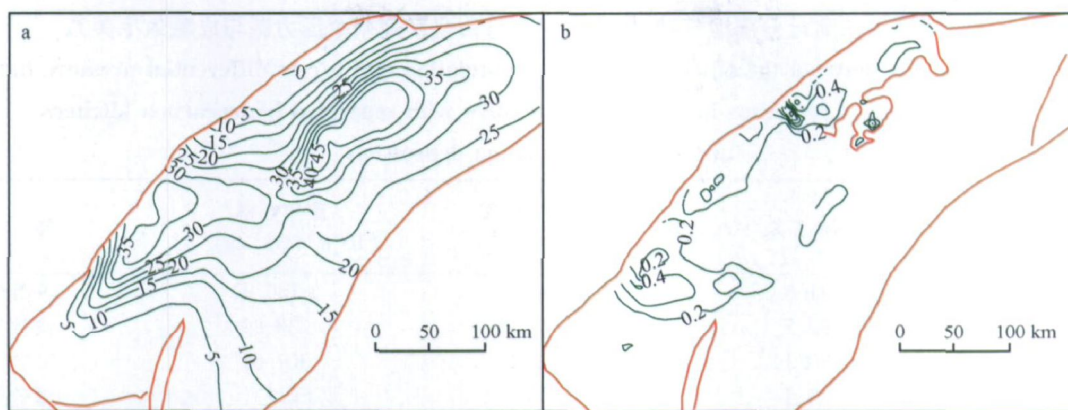


图 2 四川盆地西北部须二段浮力与剩余压力分布对比图

Fig. 2 Diagram showing the distribution of excess pressure and buoyancy in northwest Sichuan depression

剩余压力必然成为天然气运移的主要动力。

库车坳陷和川西地区的实例分析表明,无论在侧向为主的运移过程中还是以垂向为主的运移过程中,超压盆地中剩余压力差的大小均远远超过了浮力。这说明,在天然气成藏动力的两个重要组成部分中,剩余压力差较浮力发挥了更加显著的作用,是超压盆地内天然气藏形成过程中的主要驱动力。

3 剩余压力差在天然气成藏中的作用

理论分析表明,油气成藏动力可分解为剩余压力差和静浮力来共同表示;实例研究表明,在超压盆地中的剩余压力差是最主要的成藏动力。剩余压力差是如何影响天然气成藏过程,或者剩余压力差在天然气成藏中发挥了什么样的作用?

对库车坳陷源灶分离型气藏 构造成藏期的剩余压力差与成藏的关系进行了统计(表 1),结果发现具备较低平均剩余压力差的构造均未形成天然气藏(依南 1);而具备较高的剩余压力差的构造的成藏情况相对复杂,可能形成高效气藏(克拉 2、大北 1)、可能形成低效气藏(依南 2)也可能未成藏(东秋 8)。

进一步对全国 60 余个气藏的平均剩余压力差与成藏效率之间的关系的统计发现^[3],我国天然气藏的聚集效率与平均剩余压力差具有明显的门限关系,源储剩余压力差在 20 MPa 以下的气藏无一例外的为低效天然气藏;尽管所有高效的天然气藏均具备 25 MPa 以上的剩余压力差,但在平均剩余压力差高于 25 MPa 的区域内仍有部分中低效气藏;中效气藏则分布与上述两个界限之间。

这说明,剩余压力差对天然气藏的成藏效率

存在明显的控制作用,未达到一定的动力门限的构造仅能形成低效气藏甚至无法成藏;超过成藏动力门限后,受其他成藏主控因素的控制,未必形成中、高效天然气藏。剩余压力差是天然气成藏过程中的主控因素之一,高剩余压力差是高效天然气藏形成的必要条件。

4 结 论

理论分析表明,在宏观分析盆地内油气运聚过程中,控制油气成藏的动力可分解为连续油/气柱高度引起的静浮力和剩余压力差两部分。常压盆地中,浮力为主要的成藏动力;而超压盆地中这两部分和为油/气运移的最小动力。

以库车坳陷和川西地区为例,对比计算了两种不同类型运聚方式下超压盆地中剩余压力差与浮力的相对贡献。结果显示,以垂向运移为主的库车坳陷中,主成藏期间最大浮力作用不足 10 MPa 而剩余压力差普遍超过 20 MPa 各气藏部位浮力更不足剩余压力差的 1/5。而侧向运移为主的川西地区,剩余压力与浮力间更存在两个数量级的差别。这表明,无论在以断层为主要输导体的垂向运移过程,还是在以砂体为主要输导体的侧向运移过程,剩余压力差在超压盆地的油气运移动力中均占到绝对多的比例,是天然气运移的主要动力。进一步对全国 60 余个大中型气藏的统计结果显示,剩余压力差是天然气成藏的主控因素之一,是形成高效天然气藏的必要条件。

可见,剩余压力差在整个运聚动力中发挥了至关重要的作用,其大小直接控制了成藏动力的强弱,是评价天然气藏高效形成的一个重要指标,

表 1 库车坳陷藏灶分离型气藏 构造侏罗系与白垩系间剩余压力差与成藏效率关系

Table 1 The relationship between the efficiency of gas accumulation and excess differential pressure between the Jurassic and the Cretaceous in gas pools/structures with separated hydrocarbon kitchens and reservoirs in Kuqa depression

气 田	平均剩余压差 / MPa	剩余压力梯度 / (MPa·m ⁻¹)	聚集效率 / [10 ⁶ m ³ (km ² Ma) ⁻¹]	类 型
克拉 2	41.5	0.032 68	1 180.99	高效气藏
大北 1	32.5	0.057 52	338.85	高效气藏
迪那 2	30.3	0.030 20	307.66	高效气藏
依南 2	30.5	0.039 41	0.77	低效气藏
东秋 8	41.0	0.049 39		未成藏
秋参 1	26.5	0.045 69		未成藏
依南 1	18.0	0.010 62		未成藏
依南 4	14.0	0.005 42		未成藏
明南 1	10.0	0.010 21		未成藏

空白处表示由于该构造部位未成藏而无聚集效率

对其空间分布和配置关系的研究具有重要的地质意义。

参 考 文 献

- 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999 143~ 147
- 郝石生, 黄志龙, 高耀斌. 轻烃扩散系数研究及天然气运聚动平衡原理 [J]. 石油学报, 1991, 12(3): 17~ 24
- 柳广弟, 李剑, 李景明, 等. 天然气成藏过程有效性的主控因素与评价方法 [J]. 天然气地球科学, 2005, 16(2): 1~ 6
- England W A, Mackenzie A S, Mann D M, et al The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface [J]. Journal of Geological Society, 1987, 44, 327~ 347
- Mackenzie Quigley T M. Principles of geochemical prospect appraisal [J]. AAPG, 1988, 72(3): 399~ 415
- Denbicki H, Anderson M J. Secondary migration of oil experiments supporting efficient movement of separate buoyant oil phase along limited conduits [J]. AAPG, 1989, 73(8): 1 018~ 1 021
- Hindle A D. Petroleum migration pathway and charge concentration a three~ dimensional model [J]. AAPG, 1997, 81(9): 1 451~ 1 481
- Ortoleva P J. Basin compartmentation: definitions and mechanisms [J]. AAPG Memoir 1994, 61: 39~ 51
- Law B E, Shah S, Malik M. Abnormally high formation pressure, Punjab, Pakistan [J]. AAPG Memoir 1998, 70: 247~ 258
- 马启富, 陈斯忠, 张启明. 超压盆地与油气分布 [M]. 北京: 地质出版社, 2000
- Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions [J]. AAPG, 1953, 37(6): 1 954~ 2 026
- 孙冬胜, 金之钧, 吕修祥, 等. 沉积盆地超压体系划分及其与油气运聚关系 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 14~ 20
- 赵文智, 王红军, 单家增, 等. 库车坳陷天然气高效成藏过程分析 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 703~ 710
- 张洪, 何顺利, 庞雄奇, 等. 克拉 2 气田成藏过程的物理模拟 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 23~ 26
- 邹华耀, 郝芳, 张伯桥, 等. 库车山前逆冲带超压流体主排通道对油气成藏的控制 [J]. 石油学报, 2005, (2): 11~ 14
- 李剑, 谢增业, 李志生, 等. 塔里木盆地库车坳陷天然气气源对比 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 29~ 32
- 付广, 吕延防, 付晓飞, 等. 断层静止期垂向封气性评价标准的物理模拟实验及其应用 [J]. 天然气工业, 2005, (7): 20~ 22
- 邹华耀, 郝芳, 柳广弟, 等. 库车冲断带巴什基奇克组砂岩自生高岭石成因与油气成藏 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 786~ 799
- Warbrick R E, Osborne M J. Mechanisms that generate abnormal pressure: An overview [A]. In: Law B E, Uhlir G F, Slavov I, eds. Abnormal pressure in hydrocarbon environments. AAPG Memoir [C]. Tulsa: AAPG, 1998, 13~ 43
- 杨克明. 川西凹陷油气资源现状及勘探潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 322~ 326
- 饶丹. 川西坳陷上三叠统烃的运移相态研究 [J]. 石油实验地质, 1999, 21(1): 18~ 25
- 郝石生, 陈章明, 高耀斌, 等. 天然气藏的形成和保存 [M]. 石油工业出版社, 1995

(编辑 高 岩)